ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY



Check for updates

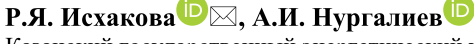
УДК 628.386
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36

Научная статья

Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила



EDN: TBZMOY

Р.Я. Исхакова , **А.И. Нургалиев** 
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация
✉ imreginaiskh@gmail.com

Аннотация
Введение. В настоящее время существует проблема накопления многотоннажных отходов производства. Одним из таких отходов является избыточный активный ил — отход биологической очистки сточных вод, характеризующийся высокой влажностью. При депонировании избыточного активного ила на картах возникают проблемы, связанные с изменением газовоздушного фона, выделением неприятных запахов, а также загрязнением грунтовых вод и почв. Продолжительное нахождение осадка на иловых картах в бескислородных условиях приводит к его загниванию, ухудшению влагоотдающих свойств. По этой причине разработка новых подходов к утилизации многотоннажного отхода, образующегося при очистке сточных вод, является актуальной. Целью данного исследования стала разработка способа предварительного обезвреживания и термической переработки избыточного активного ила с применением отхода энергетики.
Материалы и методы. В работе использовали избыточный активный ил с влажностью 98,2 % (отход IV класса опасности). В качестве реагента для повышения влагоотдачи применяли шлам водоподготовки (отход V класса опасности). Для экспериментальных исследований по обезвоживанию использовали лабораторную центрифугу Elmi CM-6M.01, на которой проводили испытания при различных условиях (500, 1 000 и 1 500 об/сек в течение 1, 2, 3 минут) и определяли значение индекса центрифугирования как критерия влагоотдачи осадка. Топливные гранулы были разработаны методом окатывания с применением в качестве связующего технического лигносульфоната. Элементный анализ образцов с целью изучения возможности термической утилизации проводился с применением анализатора EA 3 000 Euro Vector.
Результаты исследования. Разработана комплексная технология очистки образующихся газовых выбросов от твердых частиц, образующихся при сжигании топливных гранул и выносимых из топки в виде золы-уноса с уходящими газами. При этом одновременно также удаляются оксиды серы, азота, полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны при условии полезного использования тепла дымовых газов за счет снижения их температуры с 900–1200 °C до 140 °C.
Обсуждение и заключение. Предлагаемый в статье подход к переработке и утилизации многотоннажных отходов позволяет снизить влажность избыточного активного ила и использовать отход в качестве вторичного энергетического ресурса. Такой способ является экологически безопасным и позволяет решить двойную технико-экологическую задачу — эффективную переработку отходов производств, снижение антропогенной нагрузки на почвы, воздух, подземные воды, а также получение дополнительной электрической и тепловой энергии путем термической утилизации. Результаты работы свидетельствуют о возможности комплексного использования комбинации отходов различных производств (осадков сточных вод, отходов водоподготовки и целлюлозно-бумажной промышленности) в качестве вторичных энергетических ресурсов. Полученные результаты представляют практический интерес для предприятий коммунального и промышленного сектора, на которых имеются сооружения очистки сточных вод.

Ключевые слова: отходы, избыточный активный ил, обезвреживание, термическая утилизация, топливные гранулы, экологически безопасная технология

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству и коллегам ФГБОУ ВО «КГЭУ», а также благодарят анонимных рецензентов за помощь, оказанную в процессе подготовки статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21–79–10406, https://rscf.ru/project/21-79-10406/

Для цитирования. Исхакова Р.Я., Нургалиев А.И. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):26–36. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36

Research Article

Dehydration and Environmentally Friendly Thermal Processing of Excess Activated Sludge

Regina Ya. Iskhakova ✉, **Artur I. Nurgaliev**
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation
✉ imreginaiskh@gmail.com

Abstract
Introduction. Currently, there is a problem with the accumulation of large amounts of production waste. One type of this waste is excess activated sludge, which is a waste product from biological wastewater treatment that has a high moisture content. When excess activated sludge is deposited in beds, problems can arise related to changes in the gas-air environment, the release of unpleasant odors, as well as the contamination of groundwater and soil. Prolonged presence of sediment in sludge beds in oxygen-free conditions leads to its decay and deterioration of moisture-yielding properties. For these reasons, the development of new methods for disposing of large volumes of waste generated during wastewater treatment is essential. The aim of this research is to develop a technique for preliminary neutralization and thermal treatment of excess activated sludge using energy waste.
Materials and Methods. The work used excess activated sludge with a moisture content of 98.2% (waste of hazard class IV). Water treatment sludge (waste of hazard class V) was used as a reagent to increase moisture yield. For experimental studies on dehydration, a laboratory centrifuge Elmi CM-6M.01 was used. Tests were conducted under various conditions (500, 1 000, and 1 500 revolutions per second for 1, 2, and 3 minutes), and the value of centrifugation was determined as a criterion for moisture yield in the sludge. Fuel pellets were produced by rolling with technical lignosulfonate as a binding agent. Elemental analysis of the samples was conducted to study the possibility of thermal treatment using an EA 3 000 Euro Vector Analyzer.
Results. A comprehensive technology has been developed to clean the resulting gas emissions from solid particles formed during the combustion of fuel pellets and remove them from the furnace in the form of fly ash along with the outgoing gases. This technology also removed sulfur oxides, nitrogen oxides, and polychlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans, while beneficially utilizing flue gas heat by reducing its temperature from 900–1 200°C to 140°C.
Discussion and Conclusion. The approach proposed in this article for the processing and disposal of large volumes of waste allows for the reduction of moisture content of excess activated sludge and the use of this waste as a secondary energy source. This method is environmentally friendly and addresses both technical and environmental challenges, such as the effective recycling of industrial waste and reducing the anthropogenic impact on soil, air, and groundwater. It also provides an opportunity to generate additional electrical and thermal energy through thermal utilization of waste. The results of this work indicate that it is possible to integrate the use of various types of industrial waste (sewage sludge, water treatment waste, and pulp and paper industry waste) as secondary energy sources. These findings have practical implications for enterprises in both the municipal and industrial sectors with wastewater treatment facilities.

Keywords: waste, excess activated sludge, neutralization, thermal disposal, fuel pellets, environmentally safe technology

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the management and colleagues of Kazan State Power Engineering University. They would also like to thank the anonymous reviewers for their assistance during the preparation of this article.

Funding Information. The research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21–79–10406, https://rscf.ru/en/project/21-79-10406/

For Citation. Iskhakova RYa, Nurgaliev AI. Dehydration and Environmentally Friendly Thermal Processing of Excess Activated Sludge. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):26–36. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36

Введение. Обеспечение экологической безопасности путем снижения экологической нагрузки на окружающую среду посредством разработки и реализации комплексных подходов обращения с отходами является одной из ключевых целей в сфере устойчивого развития. При этом в настоящее время высокий процент отходов подвергается захоронению, так как отсутствуют высокоэффективные производства по переработке и утилизации отходов. В связи с интенсивным ростом объемов различных категорий отходов каждый год возрастает экологическая нагрузка на существующие полигоны и накопители. Все более острыми становятся проблемы загрязнения окружающей среды вследствие ненадлежащей эксплуатации полигонов, необходимости их территориального расширения. Значительная часть отходов, которая в настоящее время подвергается захоронению, может поступать на переработку и утилизацию, что позволит многократно сократить нагрузку на полигоны и получить готовый вторичный материальный ресурс, пригодный для дальнейшего вовлечения в производственный цикл.

Одним из таких отходов выступает избыточный активный ил — осадок, образующийся в процессе биологической очистки сточных вод, который отводится на иловые поля для сушки в естественных условиях. При этом в Российской Федерации образуется порядка 100 млн. тонн такого осадка ежегодно. Складирование избыточного активного ила приводит к изменению газовоздушного фона, распространению неприятных запахов и бактериальному загрязнению почв.

Еще одним многотоннажным отходом производства является шлам водоподготовки тепловых электрических станций (ТЭС), образующийся в осветлительных фильтрах при проведении известкования и коагуляции природной добавочной воды. Шлам отводится в виде пульпы на шламонакопители. При его складировании и хранении возникает проблема защелачивания почв, повышения минерализации подземных вод.

Общей проблемой, характерной для хранения многотоннажных отходов, является отчуждение сельскохозяйственных земель и территорий, а также увеличение антропогенной нагрузки на окружающую природную среду.

Для снижения антропогенной нагрузки используются различные способы утилизации отходов, в том числе избыточного активного ила [1]. Например, проводится переработка активного ила для получения адсорбционного материала для сорбции нефти и нефтепродуктов [2], а также для извлечения фосфатов и других загрязняющих вещества, присутствующих в городских сточных водах [3]. Еще одним способом утилизации активного ила является его использование в качестве добавки к органическим минеральным удобрениям [4], в строительстве при изготовлении бетонной смеси [5], а также в процессе анаэробного сбраживания для получения биогаза и использования твердой фазы (кека) как удобрения и рекультиванта [6]. Существуют работы зарубежных и современных авторов по использованию энергетического потенциала избыточного активного ила. Например, в [7] предлагается получение водорода из отработанного активного ила с применением микробной электролизной ячейки, в которой органические соединения могут быть использованы в качестве субстрата. Пиролиз активного ила является еще одним способом использования энергетического потенциала и получения дополнительной энергии при термическом разложении избыточного ила допиролизного газа, полукокса и жидкой фракции [8].

Целью данной работы явилось исследование и разработка способа предварительного обезвреживания и термической переработки избыточного активного ила с применением многотоннажного отхода энергетики.

Материалы и методы. Экспериментальные лабораторные исследования проводили с использованием избыточного активного ила — осадка биологической очистки сточных вод, видовой состав которого представлен простейшими, амебами, коловратками, инфузориями, нематодами, актиномицетами и прочими микроорганизмами.

Структура активного ила представляет собой хлопьевидную массу бурого цвета, являющуюся гетерогенной системой, относящуюся к тонким суспензиям. Был определен гранулометрический состав активного ила: частицы размером менее 1 мм составили 98 %, 1–3 мм — 1,5–1,8 %, более 3 мм — 0,4–0,6 %. Плотность используемого материала — 1,11 г/см^3. Основными органическими компонентами являются белки, жиры и углеводы, составляющие 75–85 % беззольного (органического) вещества. Остальные 15–20 % приходятся на долю лигниногумусового комплекса [9]. Компонентный состав избыточного активного ила представлен в таблице 1. В сырых осадках в основном присутствуют белковые вещества, в сброженных — гуминовые соединения [10].

Таблица 1

Компонентный состав избыточного ила

Параметр	Зольность	α-целлюлоза	Геми-целлюлоза	Белки, гуматы	Жиры	Общий азот	Фосфор
%	12–15	0,8–2,0	2,2–2,6	30–35	7,11–14,0	6,8–7,3	5,4

Влажность используемого активного ила после вторичных отстойников составляла 98,2 %, после отстаивания под действием силы тяжести снижалась до 94 %. Зольность активного ила —12,2 %. Избыточный активный ил относится к IV классу опасности.

Химический состав минеральной части избыточного активного ила включает в себя (масс. %): SiO_2 — 35,7; Al_2O_3 — 12,3; Fe_2O_3 — 7,8; CaO — 14,2; MgO — 9,4; K_2O — 0,8; Na_2O — 2,1; ZnO — 0,22; CuO — 0,12; NiO — 0,28; Cr_2O_3 — 0,23.

Избыточный активный ил относится к группе гигрофильных органических субстратов, легко загнивающих и по этой причине подлежащих обработке [11]. Органическая часть избыточного активного ила подвержена быстрому загниванию с выделением неприятного запаха, при этом увеличивается количество коллоидных и мелкодисперсных частиц, вследствие чего снижается водоотдача осадков [12].

Влага активного ила включает в себя свободную, коллоидно-связанную и гигроскопическую формы. Свободная влага не связана с твердыми частицами и легко удаляется сушкой на иловых площадках, фильтрацией или отжимом при небольших давлениях, обезвоживанием [13]. Коллоидно-связанная влага извлекается из осадков с бóльшими энергозатратами, может быть удалена фильтрацией и центрифугированием при коагуляции. Полное удаление коллоидно-связанной влаги возможно только путем сушки при повышенных температурах. Гигроскопическая (или химически связанная) влага составляет до 8–10 % от всей массы воды и не удаляется даже при термической сушке, а только путем сжигания осадка [14].

Помимо высокой влажности активный ил характеризуется низкой влагоотдачей, что связано с присутствием в нем коллоидно-связанной и гигроскопической влаги. Коллоидно-связанная влага присутствует в активном иле за счет процессов загнивания его органической части, так как загнивание характеризуется повышенным образованием мелкодисперсных, коллоидных частиц.

В исследовании предлагается извлекать коллоидно-связанную влагу за счет предварительной обработки избыточного активного ила шламом водоподготовки ТЭС и дальнейшего их совместного центрифугирования.

В качестве реагента предложено использовать шлам водоподготовки ТЭС, который является отходом V класса опасности, образующимся при подготовке добавочной воды на ТЭС. При этом шламовая пульпа направляется на шламонакопители для ее размещения и хранения. Химический состав карбонатного шлама Казанской ТЭЦ-1 (% масс.): Ca^{2+} — 87; Mg^{2+} — 9,7; CO_3^{2-} — 71,7; OH^- — 10,03; SO_4^{2-} — 5,7.

При проведении экспериментальных исследований влажность шламовой пульпы была снижена с 87 % до 3 % путем обезвоживания отхода в цехе термической осушки. В шламе присутствовали гуминовые вещества в количестве до 11 % общей массы образца, что было установлено методом газовой хромато-масс-спектрометрии [15]. Определены физико-химические характеристики шлама: насыпная плотность — 572 кг/м^3, зольность шлама — 89 %, влагоемкость — 56 % (масс.), pH среды — 8,54. Гранулометрический анализ, проведенный ситовым методом, показал, что основная фракция шлама (около 96 %) составляет 0,09–0,5 мм.

При дозировании шлам водоподготовки равномерно распределяли среди крупных волокон и твердых частиц, присутствующих в избыточном активном иле, и тщательно перемешивали осадки.

В экспериментальных исследованиях использовали лабораторную центрифугу Elmi CM-6M.01 с целью обезвоживания избыточного активного ила. Предварительно перемешанные в различных пропорциях отходы (активный ил и шлам) подвергались разделению в центрифуге при ее работе на скоростях 500, 1 000 и 1 500 об/сек в течение 1, 2, 3 минут.

Далее определяли индекс центрифугирования как критерий влагоотдачи осадка [16].

Оценку влагоотдачи и седиментационных свойств активного ила проводили по значению индекса центрифугирования *I* (см^3/ г), рассчитываемого по формуле:

$$I = \frac{V_k}{V_0 \cdot C},$$

где V_k и V_0 — объем уплотненного и исходного осадка, см^3; C — концентрация исходного осадка, г/см^3.

Индекс центрифугирования, как параметр в качестве критерия, позволяет провести оценку повышения эффективности задержания сухого вещества при предварительной обработке избыточного активного ила шламом водоподготовки. После обезвоживания осадок направляли на термическую утилизацию. Для удобства дозирования методом окатывания были разработаны топливные гранулы размером 5–7 мм. В качестве связующего были использованы технический порошкообразный лигносульфонат и технический кукурузный крахмал. Лигносульфонат представляет собой мучнистый порошок от светло-желтого до коричневого цвета, являющийся побочным продуктом при варке целлюлозной массы. Технический кукурузный крахмал является однородным порошкообразным материалом от белого до светло-жёлтого цвета и выступает одним из наиболее многофункциональных сырьевых продуктов.

Выбор связующих был обусловлен их доступностью, невысокой стоимостью, низкой влажностью (не более 8 % и 10 % соответственно) и высокой теплотой сгорания (низшая теплота сгорания — 17,2 и 16,8 МДж/кг соответственно) [17]. Выбранные связующие являются взрыво- и пожаробезопасными.

Далее определяли общетехнические характеристики полученных гранул: влажность, зольность, прочность на истирание, насыпную плотность, а также теплоту сгорания гранул. Элементный анализ образцов проводили с применением анализатора EA 3000 Euro Vector. На основании проведенных исследований проводили выбор подходящей схемы очистки газовых выбросов.

Для получения достоверных данных все экспериментальные исследования проводились не менее трех раз.

Результаты исследования. Экспериментальные исследования показали, что активный ил характеризуется высокой влажностью — 98,2 %. Для эффективного обезвоживания проведено центрифугирование избыточного активного ила и шлама водоподготовки. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1.

По результатам исследования видно, что при увеличении дозируемого шлама происходит снижение индекса центрифугирования. Наиболее оптимальным является центрифугирование избыточного ила при предварительной обработке шламом в количестве 0,6 г/дм³ в течение 1 мин со скоростью 1 000 об/с.

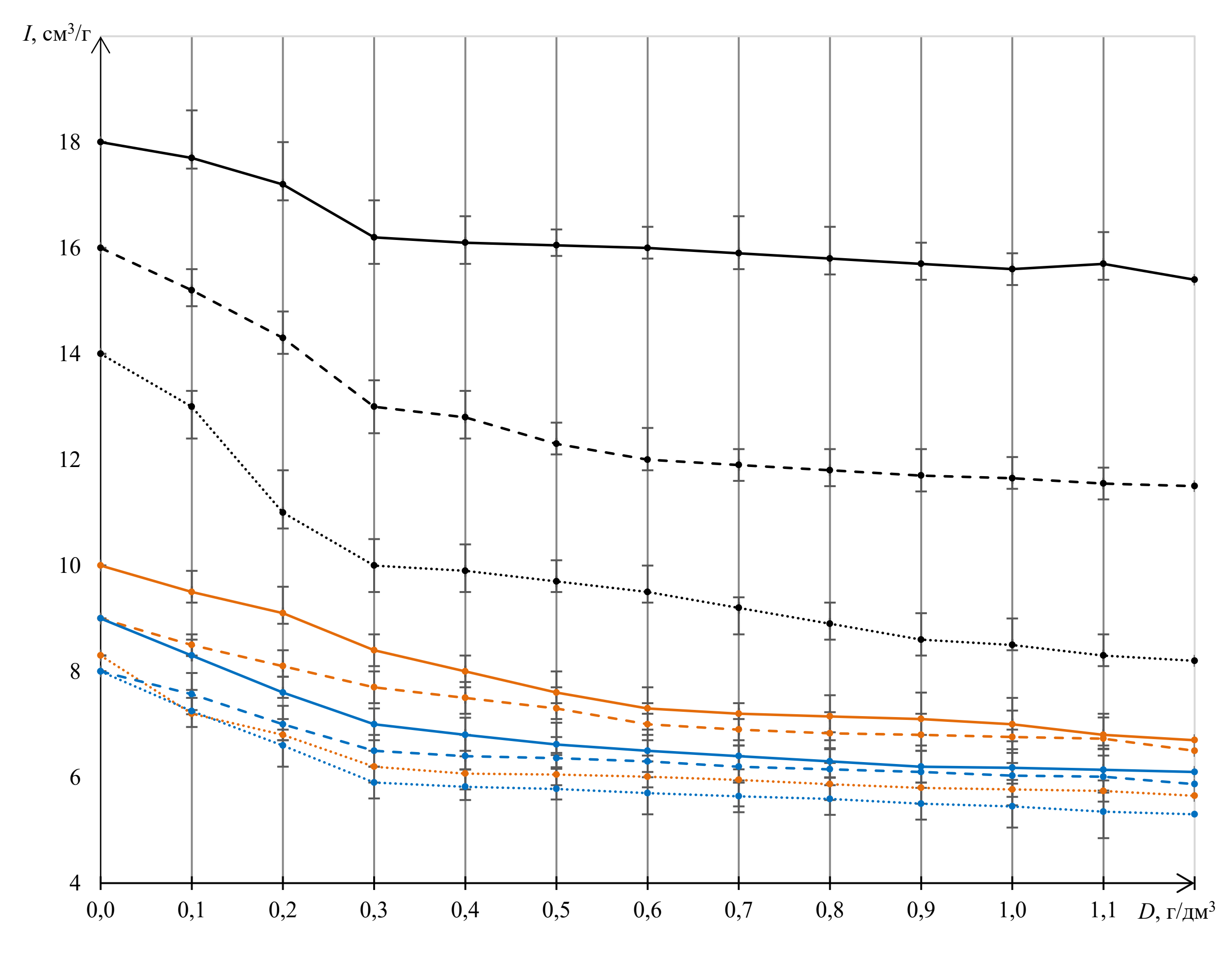


Рис. 1. Зависимость значения индекса центрифугирования (*I*) от вводимой дозы шлама (*D*):
(черная) — 500 об/мин; (оранжевая) — 1 000 об/мин; (синяя) — 1 500 об/мин;
— 1 мин; — 2 мин; — 3 мин

При центрифугировании твердые частицы шлама водоподготовки способствуют разрыву коллоидных систем и повышенному выходу гидратно-связанной влаги. Нарушается агрегативная устойчивость избыточного активного ила, что способствует повышению влагоотдачи.

Помимо этого, частицы активного ила представляют собой амфотерный коллоид и, как и большинство микроорганизмов, имеют отрицательный заряд при значениях pH=4–9 [18]. Введение шлама создает pH=8,54, что соответствует представленному диапазону значений. Хлопья активного ила заряжены отрицательно, так как заряд полимерных веществ и микроорганизмов близок к нейтральному или небольшому отрицательному. При этом адсорбция внеклеточных полимеров на микроорганизмах происходит за счет нейтральных групп и не связана с изменением заряда.

На поверхности шлама присутствуют положительно заряженные катионы Ca^{2+}. Извлечение коллоидно-связанной влаги происходит с высокой эффективностью, так как при обработке шламом водоподготовки, выступающим как коагулянт, происходит нейтрализация заряда и укрупнение частиц и, как следствие, повышение влагоотдающих свойств и снижение удельного сопротивления осадка.

В результате предварительной обработки шламом и дальнейшего центрифугирования изменяется структура осадка избыточного активного ила. При отсутствии предварительной обработки шламом активный ил прочно удерживает влагу и характеризуется низкой влагоотдающей способностью, в то время как при введении шлама из избыточного активного ила извлекается коллоидно-связанная влага. В результате образуется твердая фаза, которая легко отделяется от фугата после центрифугирования.

Гигроскопическая или химически связанная влага, составляющая около 3–8 % от общей влаги, присутствующая в избыточном активном иле, извлекается только при термической утилизации.

Далее смешанный осадок, имеющий влажность не более 60–64 %, направляется на формование топливных гранул диаметром 5–7 мм с применением связующих технического лигносульфоната и технического крахмала. Гранулы такого размера разрабатываются для удобного перемещения пневмотранспортными установками, а также для повышения точности дозирования топлива. В качестве связующих предпочтение отдается экологически безопасным веществам с хорошими теплотворной способностью и сцепляющими свойствами.

Важными характеристиками полученных гранул, влияющих на эффективность термической переработки, являются технические и теплотехнические свойства, которые представлены в таблице 2.

По результатам исследований основным энергетическим показателем, характеризующим топливные гранулы, являлась теплота сгорания. По этой причине для термической переработки были выбраны гранулы с техническим лигносульфонатом, так как они имеют более высокое значение теплотворной способности. Полученное значение теплоты сгорания разработанных гранул сравнимо с теплотворной способностью торфа.

Таблица 2

Технические характеристики топливных гранул

Образцы со связующими	Крахмал технический (22 % масс.)	Лигносульфонат технический (22 % масс.)
Влажность, %	4,8±0,1	3,1±0,1
Насыпная плотность, кг/м^3	828	788
Зольность, %	29,2	27,9
Цвет золы	светло-серый	светло-коричневый
Прочность на истирание, %	0,5	0,1
Теплота сгорания, МДж/кг	9 672,6	10 345,5

Теплота сгорания топливных гранул, помимо влажности и зольности (внешнего балласта топлива), определяется соотношением основных элементов (C, H, N, S) и зависит от содержания горючих элементов (углерода, водорода и серы) [13].

Элементный состав топливных гранул с применением технического лигносульфоната показал следующие значения: C^p=30,1 %; H^p=2,9 %; S^p=1,1 %; N^p=1,24 %. К основным горючим элементам относят углерод (34,1 МДж/кг) и водород (120,5 МДж/кг). Сера, азот, содержащиеся в топливных гранулах, образуют токсичные оксиды серы и азота, которые необходимо извлекать из газовых выбросов после термической утилизации. При этом сера имеет более низкую теплоту сгорания (9,3 МДж/кг), а азот содержится в топливных гранулах в виде органических соединений и снижает теплотворную способность топлива.

Предложена технология утилизации осадков, основанная на предварительном обезвоживании и их термической переработке в циркулирующем кипящем слое с утилизацией тепла отходящих газов, образующихся после процесса сжигания активного ила и очистки уходящих газов (рис. 2).

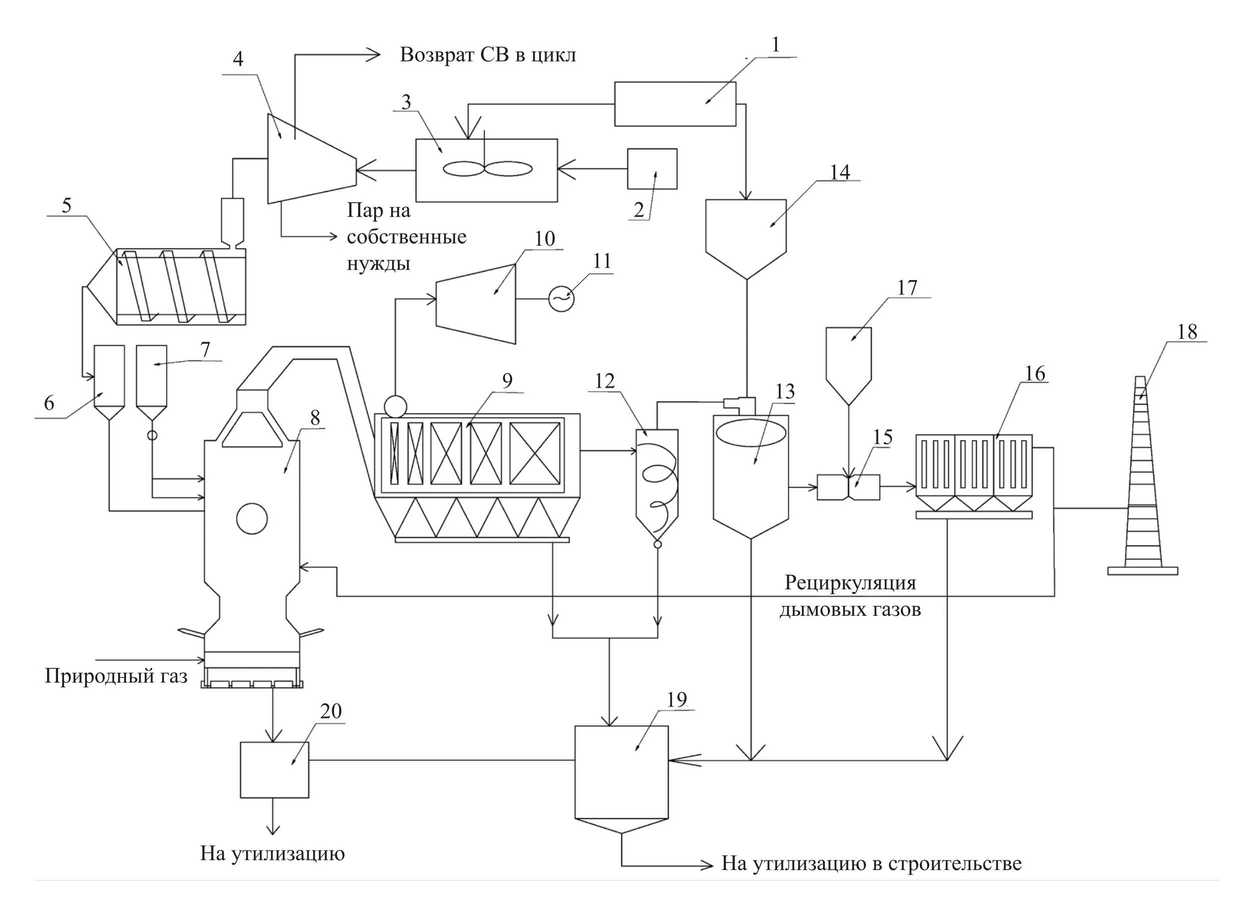


Рис. 2. Технологическая схема термической переработки осадков сточных вод:
1 — бункер хранения шлама; 2 — накопитель избыточного активного ила; 3 — бункер перемешивания осадка; 4 — декантер; 5 — гранулятор (экструдер); 6 — бункер хранения топливных гранул; 7 — бункер хранения инертного материала; 8 — котел с циркулирующим кипящим слоем; 9 — котел-утилизатор тепла дымовых газов; 10 — паровая турбина; 11 — электрогенератор; 12 — циклон; 13 — распыливающий абсорбер; 14 — бункер приготовления суспензии; 15 — аппарат ввода активного угля; 16 — рукавный фильтр; 17 — бункер хранения активного угля; 18 — дымовая труба; 19 — бункер сбора золы и продуктов реакций; 20 — бункер сбора шлака

Сжигание гранул из бункера хранения 6 происходит в котле с циркулирующим кипящим слоем 8, который характеризуется эффектом псевдоожижения или «кипения» за счет восходящего газового потока и интенсивного перемешивания частиц (с участием инертного материала из бункера 7 — песка (оксида кремния), обладающего высокой удельной теплоемкостью (0,835 кДж/(кг К)), стабилизирующего температуру процесса при качественном или количественном колебании топливных гранул на основе активного ила). Интенсивное кипение слоя способствует перемешиванию топливных гранул, окислителя, а также продуктов сгорания. Поэтому отсутствует необходимость дополнительного механического перемешивания гранул. Для воспламенения при пуске установки осуществляется подвод природного газа.

После сгорания газы с температурой около 900 –1 200 °С проходят котел-утилизатор 9, в котором происходит нагрев химически обессоленной воды до состояния пара. Пар направляется на турбину 10, с помощью электрогенератора 11 вырабатывается электрическая энергия. Частично пар из теплофикационных отборов направляется на собственные нужды предприятия. Газы, охлажденные до температуры 200–250 °С, направляются на очистку в фильтрующий блок, состоящий из механической очистки и оборудования очистки газовых выбросов абсорбционными и адсорбционными методами. Улавливание твердых дисперсных частиц осуществляется путем использования циклонов и рукавных фильтров. Охлажденные газы поступают в циклоны 12 для извлечения золы-уноса, а также инертного материала, выносимого вместе с дымовыми газами. Далее дымовые газы направляются в распыливающий адсорбер 13, в котором осуществляется полная их доочистка от хлористого водорода, сернистого газа, оксидов азота, а также частично от полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов. Для этого дозируется отход водоподготовки из бункера 1 в качестве сорбционного материала. После распыливающего адсорбера 13 температура уходящих газов составляет 140 °С. Доочистка от полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов осуществляется путем распыла активированного угля из бункера 17 в аппарате 15 перед рукавными фильтрами. Оставшаяся зола-уноса, а также непрореагировавший шлам и продукты химических реакций улавливаются с помощью рукавного

фильтра 16 и собираются в бункере сбора золы и продуктов реакций 19. После очистки дымовых газов с использованием рукавных фильтров 16 для очистки выбросов в атмосферу от оксидов азота применяется способ рециркуляции дымовых газов путем отбора 20–30 % газовых сред из газохода и их подачи в зону активного горения котла с циркулирующим кипящим слоем 8. После полной очистки уходящие газы направляются в дымовую трубу 18.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследований указывают на наличие энергетического потенциала разработанных гранул, который можно преобразовать в тепловую и электрическую энергию при условии экологической безопасности и минимизации негативного воздействия на окружающую природную среду.

Выбор котла с циркулирующим кипящим слоем является оптимальным решением для данной технологии из прочих существующих, так как интенсивное кипение слоя способствует перемешиванию топливных гранул, окислителя, а также продуктов сгорания. Поэтому отсутствует необходимость дополнительного механического перемешивания гранул. Для воспламенения гранул при пуске установки осуществляется подвод природного газа.

При использовании в котле с кипящим слоем топливных гранул на основе активного ила, шлама и связующего, происходит реакция термического разложения карбоната кальция при температуре 900–1 200 °С и дальнейшее связывание оксида серы с получением гипса с последующим его выносом. В слое будут протекать следующие реакции:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 + 178{,}8 \text{ кДж/моль};$$
$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \rightarrow CaSO_4 - 500 \text{ кДж/моль}.$$

В органической части активного ила также присутствуют соединения хлора, а также фтора. В кипящем слое соединения хлора и фтора подвергаются высокотемпературному разложению (пирогидролизу) с превращением в хлористый и фтористый водород, которые далее взаимодействуют с оксидами кальция по следующим реакциям:

$$CaO + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O;$$
$$CaO + 2HF \rightarrow CaF_2 + H_2O.$$

Однако, при использовании данного решения требуется доочистка газовых выбросов, образующихся в котле с циркулирующим кипящим слоем, а именно: извлечение твердых частиц, образующихся при сжигании топливных гранул и выносимых из топки в виде золы-уноса с уходящими газами, а также удаление остаточных оксидов серы, азота, полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов.

Достоинством предложенного в статье подхода является возможность обезвреживания токсичных продуктов сгорания, которые образуются при сжигании.

Оксиды серы, хлористый и фтористый водород, а также полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны извлекаются с применением распыливающего адсорбера и адсорбционной доочистки дымовых газов активированным углем. Для проведения доочистки в распыливающем адсорбере традиционно дозируется суспензия известняка. Так как карбонат кальция является одним из основных компонентов шлама водоподготовки, то реализуется использование его в качестве реагента отхода теплоэнергетики. Важным условием является хорошее перемешивание капель суспензии с уходящими газами, а также обеспечение тонкого распыливания суспензии.

При поглощении SO_2 шламом теплоэнергетики протекают химические реакции:

$$H_2SO_3 \leftrightarrow SO_2 + H_2O;$$
$$H_2SO_3 + CaCO_3 + H_2O \rightarrow CaSO_3 \cdot H_2O \downarrow + CO_2 \uparrow.$$

Удаление полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов частично происходит в распыливающем адсорбере по следующим реакциям:

$$C_{12}H_nCl_{8-n} \cdot O_2 + (9 + 0{,}5n)O_2 \rightarrow (n-4)H_2O + 12CO_2 + (8-n)HCl;$$

$$C_{12}H_nCl_{8-n} \cdot O + (9{,}5 + 0{,}5n)O_2 \rightarrow (n-4)H_2O + 12CO_2 + (8-n)HCl.$$

Данный подход показал свою эффективность при сжигании твердых коммунальных отходов [19] и также может быть внедрен в практику термической утилизации осадков сточных вод.

Для полной доочистки дымовых газов от оксидов азота до значений нормативов допустимого выброса проводится частичная рециркуляция дымовых газов путем их подачи в зону активного горения котла. Этот подход позволяет снизить концентрацию NO_x до требуемых значений. Данный метод имеет широкое применение в топочных процессах энергетических котлов и также может применяться для котлов с циркулирующим кипящим слоем.

Применение предложенного в статье метода термического обезвреживания отходов производства — избыточного активного ила и шлама теплоэнергетики — различными отраслями промышленности позволяет сохранить природные виды органического топлива, снижает антропогенную нагрузку на окружающую природную среду. При этом решается двойная технико-экологическая задача: эффективная переработка отходов производств, ликвидация иловых

полей, шламонакопителей и сопутствующих проблем, связанных со складированием многотоннажных отходов и отчуждением территорий, а также получение дополнительной энергии с применением экологически безопасного способа термического обезвреживания.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет реализовать экологически безопасный способ утилизации при реализации природоохранных мероприятий, эффективно переработать многотоннажные отходы и реализовать принцип энергоресурсосбережения на промышленных и на коммунальных предприятиях, в которых присутствует система очистки сточных вод.

Список литературы / References

1. Солодкова А.Б., Собгайда Н.А., Шайхиев И.Г. Разработка технологии изготовления и использования адсорбента на основе отработанного активного ила для очистки сточных вод. *Вестник Казанского технологического университета.*2012;15(20):179–182.

Solodkova AB, Sobgaida NA, Shaikhiev IG. Development of Technology for the Manufacture and Use of an Adsorbent Based on Spent Activated Sludge for Wastewater Treatment. *Herald of Kazan Technological University.* 2012;15(20):179–182. (In Russ.).

2. Москвичева Е.В. Войтюк А.А., Доскина Э.П., Игнаткина Д.О., Юрьев Ю.Ю., Щитов Д.В. Совершенствование технологии очистки городских сточных вод с использованием сорбента на основе избыточного активного ила. *Инженерный вестник Дона.* 2015;2–2(36):2–28. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_moskvicheva.pdf_c2b9890852.pdf (дата обращения: 24.01.2024).

Moskvicheva EV, Voytyuk AA, Doskina EP, Ignatkina DO, Yuriev YY, Shitov DV. Improving the Technology of Municipal Wastewater Treatment with the Use of the Sorbent on the Basis of Surplus Sludge. *Engineering Journal of Don.* 2015;2–2(36):2–28. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_moskvicheva.pdf_c2b9890852.pdf (accessed: 24.01.2024) (In Russ.).

3. Jing Li, Lu Cao, Bing Li, Haiming Huang, Wei Yu, Cairui Sun, et al. Utilization of Activated Sludge and Shell Wastes for the Preparation of Ca-Loaded Biochar for Phosphate Removal and Recovery. *Journal of Cleaner Production*. 2023;382(1):135395. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135395

4. Jinyu Zeng, Duoduo Chen, Jing Zhu, Caicheng Long, Taiping Qing, Bo Feng, et al. Phosphate Recovery Using Activated Sludge Cyanophycin: Adsorption Mechanism and Utilization as Nitrogen-Phosphorus Fertilizer. *Chemical Engineering Journal*. 2023;476(11):146607. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146607

5. Чернова К.С., Баурина М.М., Градова Н.Б. Изучение влияния автолизатов активного ила метантенков на прочностные характеристики строительных материалов. *Успехи в химии и химической технологии.*2019;33(5(215)):47–48.

Chernova KS, Baurina MM, Gradova NB. The Influence of Activated Sludge Autolizates on the Strength Characteristics of Construction Materials. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* 2019;33(5(215)):47–48. (In Russ.).

6. Taira Hidaka, Masato Nalamura, Fumiko Oritate, Fumitake Nishimura. Utilization of High Solid Waste Activated Sludge from Small Facilities by Anaerobic Digestion and Application as Fertilizer. *Water Science & Technology.* 2019;80(12):2320–2327. https://doi.org/10.2166/wst.2020.050

7. Qizi Fu, Dongbo Wang, Xiaoming Li, Qi Yang, Qiuxiang Xu, Bing-Jie Ni, et al. Towards Hydrogen Production from Waste Activated Sludge: Principles, Challenges and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;135(1):110283. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110283

8. Manu Agarwal, James Tardio, S. Venkata Mohan. Pyrolysis of Activated Sludge: Energy Analysis and Its Technical Feasibility. *Bioresource Technology.* 2015;178(2):70–75.https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.134

9. Гульшин И.А., Гогина Е.С. Одноиловая система низкокислородной технологии глубокой очистки сточных вод от соединений азота. Вода и экология: проблемы и решения. 2019;4(80):9–19. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.9-19

Gulshin I, Gorina E. Single-Sludge System of Advanced Low-Oxygen Wastewater Treatment with Nitrogen Compounds Removal. *Water and Ecology*. 2019;24(4):9–19. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.9-19 (In Russ.).

10. Anikin YuV, Shilkov VI. Modern Materials and Technologies of Industrial Wastewater Treatment. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2018;4(2):22–26. https://doi.org/10.15826/rjcst.2018.2.004

11. Jiahua Xia, Ting Rao, Juan Ji, Bijuan He, Ankang Liu, Yongjun Sun. Enhanced Dewatering of Activated Sludge by Skeleton-Assisted Flocculation Process. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(11):6540 https://doi.org/10.3390/ijerph19116540

12. Дремичева Е.С. Проблемы загрязнения водоемов нефтесодержащими сточными водами промышленных предприятий и варианты их решения. *Химическая безопасность*. 2021;5(2):66–77. https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20003

Dremicheva ES. Problems of Pollution of Water Bodies with Oil-Containing Wastewater of Industrial Enterprises and Options for Their Solution. *Chemical Safety Science*. 2021;5(2):66–77. https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20003 (In Russ.).

13. Ksenofontov BS, Kapitonova SN, Vasilieva YaS, Zhigalova AA. Engineering Problems of Dehydration and Disposal of Sewage Sludge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;864(1):012040. https://doi.org/10.1088/1755-1315/864/1/012040

14. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. *Водоотведение и очистка сточных вод.* Москва: АСВ; 2006. 704 с.

Voronov YuV, Yakovlev SV. *Wastewater Disposal and Treatment.* Moscow: ASV; 2006. 704 p. (In Russ.).

15. Николаева Л.А., Исхакова Р.Я., Травникова А.В., Нургалиев А.И. Очистка сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ с использованием отхода энергетики в качестве вторичного материального ресурса. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности.* 2023;1:93–100 https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.22.56.011

Nikolaeva LA, Iskhakova RY, Travnikova AV, Nurgaliev AI. Waste Water Treatment from Anionic Synthetic Surfactants Using Energy Waste as a Secondary Material Resource. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety.* 2023;1:93–100 https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.22.56.011 (In Russ.).

16. Ильин В.И., Бродский В.А., Колесников В.А. Разработка технологических решений для очистки сточных вод от загрязнений органической природы. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение.* 2015;4(88):16–19.

Il'in VI, Brodsky VA, Kolesnikov VA. Development of Technological Solutions for Wastewater Treatment of Organic Waste. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie.* 2015;4(88):16–19. (In Russ.).

17. Евстифеев Е.Н., Кужаров А.С., Попов Е.М. Разработка нового связующего для производства бездымных брикетов из антрацитовых штыбов. *Уголь*. 2014;(4):68−70.

Evstifeev EN, Kuzharov AS, Popov EM. Development of a New Binder for the Production of Smokeless Briquettes from Anthracite Culms. *Ugol'*. 2014;(4):68−70. (In Russ.).

18. Богданова А.Д. Методы очистки сточных вод. Биологическая очистка. *Труды межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов «Дни науки» Калининград, 2018*. Калининград: Издательство КГТУ; 2018. С. 343–348.

Bogdanova AD. Methods of Wastewater Treatment. Biological Purification. In: *Proceedings of the interuniversity scientific and technical conference of students and cadets "Days of Science" Kaliningrad, 2018.* Kaliningrad: KSTU Publishing House; 2018. P. 343–348. (In Russ.).

19. Тугов А.Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор). *Теплоэнергетика.* 2021;(1):3–20. https://doi.org/10.1134/S0040363621010185

Tugov AN. Modern Technologies for the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, and Prospects for Their Implementation in Russia (Review). *Thermal Engineering.* 2021;(1):3–20.https://doi.org/10.1134/S0040363621010185 (In Russ.).

Об авторах:

Регина Яновна Исхакова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии и безопасности труда Казанского государственного энергетического университета (420066, РФ, г. Казань, ул. Красносельская, 51), SPIN-код: 5799-6057, ORCID, ResearcherID, ScopusID, imreginaiskh@gmail.com

Артур Ильесович Нургалиев, студент 3 курса по направлению химической технологии Казанского государственного энергетического университета (420066, РФ, г. Казань, ул. Красносельская, 51), SPIN-код: 9360-6861, ORCID, artur_nurgaliev022@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Р.Я. Исхакова — постановка задачи исследования; анализ полученных экспериментальных результатов, описание теоретической части исследования.

А.И. Нургалиев — проведение экспериментальных исследований по определению характеристик, обезвоживанию и разработке топливных гранул, оформление научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 15.02.2024
Поступила после рецензирования 07.03.2024
Принята к публикации 18.03.2024

About the Authors:

Regina Ya. Iskhakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Engineering Ecology and Labor Safety Department, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, RF), SPIN-code: 5799-6057, ResearcherID, ScopusID, ORCID, imreginaiskh@gmail.com

Artur I. Nurgaliev, 3rd year student in the specialty Chemical Technology, Kazan State Power Engineering University (51, Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, RF), SPIN-code: 9360-6861, ORCID, artur_nurgaliev022@mail.ru

Claimed Contributorship:

RYa Iskhakova: statement of the research task, analysis of the experimental results, description of the theoretical part of the study.

AI Nurgaliev: experimental studies on characterization, dewatering and development of fuel pellets, scientific article design.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 15.02.2024
Revised 07.03.2024
Accepted 18.03.2024